

# 半绝缘 GaAs 的表面光伏谱研究\*

陈宜保<sup>1,2)</sup> 江德生<sup>1)</sup> 王若桢<sup>2)</sup> 郑红军<sup>3)</sup> 孙宝权<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院半导体研究所,超晶格国家重点实验室,北京,100083)

<sup>2)</sup>北京师范大学物理系,北京,100875;

<sup>3)</sup>中国科学院半导体研究所,北京,100083)

TN304.23

**摘要:**利用表面光伏法(SPV)研究了半绝缘 GaAs(SI-GaAs)的缺陷态.通过加直流光偏置测量了室温下带边以下的光伏响应,发现带隙内缺陷态的光伏响应主要是由于表面复合而在样品表面形成载流子浓度梯度引起的,通过实验表明 SPV 是一种对 SI-GaAs 晶片表面质量进行检测的非常灵敏的无损检测方法.

**关键词:**表面光伏谱, SI-GaAs, 无损检测.

砷化镓, 半导体

## THE INVESTIGATIONS ON SEMI-INSULATING GaAs BY SURFACE PHOTOVOLTAIC SPECTROSCOPY

CHEN Yi-Bao<sup>1,2)</sup> JIANG De-Sheng<sup>1)</sup> WANG Ruo-Zhen<sup>2)</sup>

ZHENG Hong-Jun<sup>2)</sup> SUN Bao-Quan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2)</sup>Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

<sup>3)</sup>Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** The surface photovoltage (SPV) effect induced by the defect states in semi-insulating (SI) GaAs was studied. The PV response below the band edge was measured at room temperature with a dc optical biasing. The spectra were found to be strongly dependent on the surface recombination and were attributed to formation of the carrier concentration gradient near the surface region, showing that SPV is a very sensitive and nondestructive technique for characterizing the surface quality of the SI-GaAs wafers.

**Key words** surface photovoltaic spectroscopy, SI-GaAs, nondestructive technique.

### 引言

半绝缘(SI) GaAs 是利用分子束外延(MBE)技术生长半导体器件和低维结构中常用的一种重要衬底材料<sup>[1]</sup>,其质量对生长的器件和结构有至关重要的影响.一些常见的对 SI-GaAs 检测方法常常具有破坏性(如电镜检测)或需要在样品上作电极<sup>[2-4]</sup>.近年来,光伏方法作为一种高灵敏度的无损检测方法开始被用于检测 SI-GaAs<sup>[5,7]</sup>,但通常都是对 GaAs 带边以上光伏响应进行测量和分析,而对于 SI-GaAs 带隙中的杂质缺陷和表面损伤导致的光伏响应的报导却很少.我们用一种加直流偏置光照的光伏实验技术对不同表面质量的一系列 SI-GaAs 样品进行了测量,发现光伏方法对定性

检测和分析 SI-GaAs 禁带中的杂质缺陷和表面损伤引起的能量状态很灵敏,是一种较好的高灵敏无损检测手段.

### 1 样品及实验

本实验所用样品是在高压富砷条件下用液封直拉法生长的非故意掺杂的半绝缘砷化镓体单晶,经常规热退火处理,作为电学均匀高阻(室温下  $\rho > 1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ )的外延衬底材料,锭条沿  $\langle 100 \rangle \pm 0.5^\circ$  取向,加工成  $\phi 2''$  晶片,切片后经过表面抛光处理.我们分别取经不同处理过程的 4 块晶片作为实验样品:(1)切割片,直接从体单晶材料上切下来的厚度为  $690 \mu\text{m}$  的晶片,表面粗糙;(2)粗磨片,用粒径为  $2 \sim 4 \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$

\* 国家自然科学基金(编号:69876037)资助项目  
稿件收到日期 1999-04-14,修改稿收到日期 1999-05-25

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China  
Received 1999-04-14, revised 1999-05-25

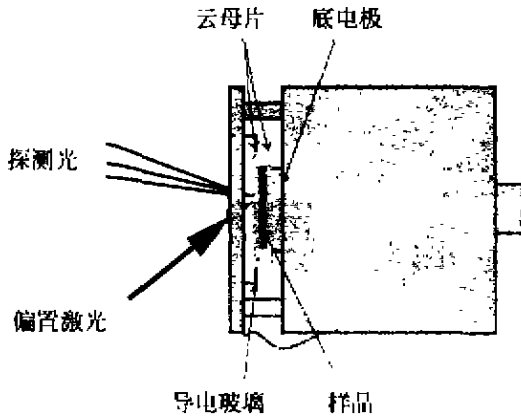


图1 电容耦合法取样品光伏信号的样品架结构图  
Fig. 1 The schematic diagram of the sample holder for photovoltage measurements through capacitance coupling

磨砂对切割片进行双面研磨,晶片每面除去约 30 $\mu\text{m}$ ;(3)粗抛片,先经化学腐蚀,再利用 SiO<sub>2</sub> 胶体水溶液(粒径为 0.05~0.07 $\mu\text{m}$ )及相关添加剂和粗抛光布继续进行化学机械粗抛光,所得晶片表面比较光亮;(4)细抛片,利用与(3)相同的抛光剂和细抛光布对粗抛片进一步进行化学机械抛光,所得晶片表面光亮.我们把这 4 种样品依次标记为 LS1、LS2、LS3 和 LS4.电镜分析表明表面损伤厚度依次分别为 17.5 $\mu\text{m}$ 、11.2 $\mu\text{m}$ 、4 $\mu\text{m}$  和 30nm.另外,在化学抛光处理时,样品背面没有用蜡封保护,样品背面也得到了-定的抛光.

光伏实验采用电容耦合法测量开路光伏信号,样品架如图 1 所示,样品前后表面的云母片起隔断作用,相当于形成一个平板电容,当有交变光照射到样品表面时,将产生交变的光伏信号,通过导电石英玻璃上电极和下铜电极用电容耦合法将光伏信号送往锁相放大器.

实验所用探测光是碘钨灯光源经 H-25 型光栅单色仪分光得到的单色光,经频率为 180Hz 的斩波调制,在样品表面形成交变光照.另外,在某些测量中用一束波长为 811.7nm 的激光附加照射到样品表面作为直流偏置光照.室温下,激光光子能量大于 GaAs 禁带宽度  $E_g$ ,因而能产生本征激发.由于未对激光斩波调制,在样品上产生的光伏信号不能被耦合取出.

## 2 实验结果和讨论

4 种不同表面质量样品在室温下不加偏置激光时的光伏谱如图 2 所示,从图中可以看到 GaAs 带边(室温下为 1.424eV)以上有很强 的光伏响应.带边光伏响应向低能方向延伸到 1.38eV,这可能是 SI-GaAs 中

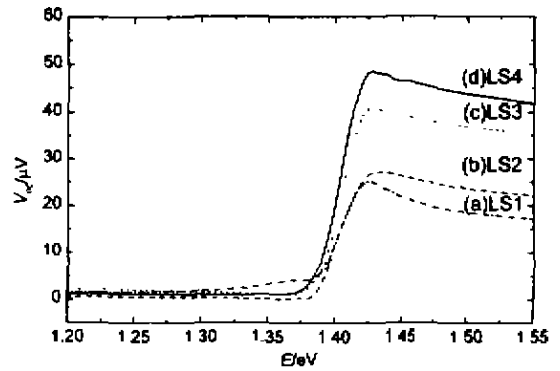


图 2 室温下未加激光偏置时四种不同表面质量 SI-GaAs 样品 LS1-LS4 的光伏谱  
Fig. 2 The PV spectra of SI-GaAs samples LS1-LS4 at room temperature without dc optical bias

的连续带尾态所致.对比 4 种样品的光伏谱,发现样品表面质量越好,其带边上方光伏响应越强.

在一般半导体材料中光伏信号的产生是由于光生载流子在样品表面势垒电场的作用下发生了空间分离<sup>[1]</sup>.但对 SI-GaAs 而言,由于它的费米能级  $E_f$  被钉扎在带隙中间,由表面态的占据所决定的表面费米能级  $E_s$  和体内  $E_f$  相差很小;加上表面空间电荷区很宽,所以一般表面能带弯曲很小,几乎没有表面电场,似乎很难测量到光伏信号.但实验中却发现 SI-GaAs 中光伏信号很强<sup>[6,7]</sup>,这说明 SI-GaAs 中有很强的丹倍效应,这也被王若桢等人关于 SI-GaAs 的调制光谱的研究所证实<sup>[4]</sup>.

通过求解电流密度方程和连续性方程,在吸收系数  $\alpha$  及通量为  $\varphi$  的光照下,由本征吸收而产生的开路光生电压  $V_{oc}$  为<sup>[6,9]</sup>

$$V_{oc} = \frac{kT(\mu_n - \mu_p)}{\sigma_0} \frac{\alpha L_e}{(S + D_e/L_e)(1 + \alpha L_e)} \quad (1)$$

式中  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子和空穴的迁移率,  $D_e = 2D_n D_p / (D_n + D_p)$  是双极扩散系数( $D_n$  和  $D_p$  分别为电子和空穴的扩散系数),  $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$  是双极扩散长度,  $\tau_e$  是双极载流子寿命,  $\sigma_0$  为暗电导率,  $S$  是表面复合速率.

由于 SI-GaAs 具有很小的电导率  $\sigma_0$ , GaAs 有较大的载流子迁移率差别 ( $\mu_n - \mu_p$ ),因此在 SI-GaAs 中能观测到很强的光伏响应.由本征吸收而产生的光伏主要产生在光照表面区.从式(1)可知,表面复合速率  $S$  越大,样品的开路光伏信号  $V_{oc}$  越小.因为细抛光表面质量最好,其表面复合速率也就相应要小,它的光伏信号也就最强.

当我们在样品表面附加一直流的偏置光照后,因为激光能量高于带隙,必然会在样品表面区透入深度内引起样品的本征吸收而产生大量的光生载流子.对 SI-GaAs 而言,由于其电阻率  $\rho$  非常高,因此本征载流子浓度  $n_0$  很小(室温下约  $2 \times 10^6/\text{cm}^3$ ),而直流光照产生的载流子浓度远大于本征载流子浓度,并在样品体内形成稳定的梯度分布.所以,当能量高于  $E_g$  的交变探测照射到样品上时,其透入深度和偏置光差不多,不能再在样品体内产生大的交流载流子浓度梯度,因此不能产生交变的光伏信号.但对于能量低于  $E_g$  的交变探测光,则是另一种情况.此时样品对探测光而言,近似透明,探测光可以一直透射到样品背面.由于偏置激光在样品内透入深度有限,远小于样品厚度  $d$  ( $ad \ll 1$ ),因此样品背面和不加偏置激光时一样,只有很低浓度的本征载流子.我们近似地认为,在样品体内由于吸收所产生的载流子浓度基本上均匀分布,但在样品背面的表面复合的作用,必然在近样品背面区产生一过剩载流子浓度梯度,进而使载流子在背面方向发生纵向扩散.由于 SI-GaAs 带边附近吸收一般发生在受主(施主)和导带(价带)之间,因此往往只有一种载流子(如电子)可以自由移动并产生光伏信号.

图 3 为是样品 LS3(粗抛片)在不加电流偏置和加直流偏置激光两种条件下的光伏谱.可以看出,加了偏置激光以后,带边以上的光伏信号明显被抑制掉了,而在带边以下有明显的光伏响应,与前面的分析一致.应当指出,当不加偏置激光时,由于载流子在样品前后表面的复合作用,能量低于 SI-GaAs 带边的探测光也同样会引起光伏响应,只不过从上面的分析可知,样品前后表面引起的光伏响应的极性是相反的<sup>[10]</sup>,如果前后表面的质量相同,基本上信号将相互抵消,因而只有

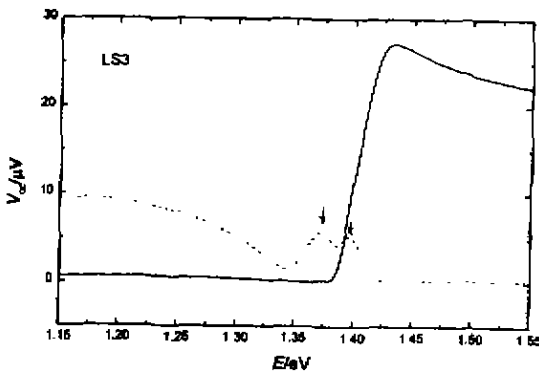


图 3 室温下样品 LS2 在不加激光偏置(实线)和加激光偏置(点线)时的光伏谱.偏置激光能量为 1.524eV,功率约为 1mW

Fig. 3 The PV spectra of SI-GaAs sample LS2 at room temperature without (solid line) and with (dot line) a dc optical bias

通过加直流偏置激光屏蔽掉前表面的影响后,才能探测到样品带隙内的电子态引起的光伏响应.我们的实验结果证实了这一点.

对带隙内的光吸收,我们假定是与受主态有关来进行分析.一维情况下电子的电流密度方程为<sup>[9]</sup>

$$J_n = q\mu_n n(x)\xi(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx}, \quad (2)$$

式中  $\xi(x)$  是电场,  $n(x)$  是电子浓度,  $D_n$  是电子扩散系数.开路情况下,电流  $J_n$  应该为零,有

$$\xi(x) = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx}. \quad (3)$$

则  $h\nu < E_g$  的光在样品表面产生的开路光伏信号为

$$V_n = \int_0^L \xi(x) dx = \frac{D_n}{\mu_n} \ln \frac{n_0 + \Delta n(0)}{n_0 + \Delta n(\infty)}. \quad (4)$$

其中积分上限取无穷大是因为产生光伏信号的区域远大于电子的扩散长度  $L_n$ ,  $\Delta n(0)$  和  $\Delta n(\infty)$  是在  $x=0$  (坐标的选取是由样品背表面指向体内,样品后表面处为坐标原点)和体内的非平衡载流子的浓度,这里  $n_0$  是平衡载流子浓度,  $\Delta n(\infty) = \tau_n G$ ,  $\tau_n$  是电子寿命,  $G$  是光生载流子的产生率.

稳态连续性方程为<sup>[9]</sup>

$$G - \frac{\Delta n(x)}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 \Delta n(x)}{\partial x^2} = 0. \quad (5)$$

求解式(5)的边界条件为:  $qD_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \Big|_{x=0} = qS \Delta n(0)$ , 其中  $S$  是表面复合速率.式(5)的解是

$$\Delta n(x) = \tau_n G \left[ 1 - \frac{\tau_n S \exp(-x/L_n)}{L_n + \tau_n S} \right]. \quad (6)$$

结合(4)式,可得开路光伏信号为

$$V_n = \frac{D_n}{\mu_n} \ln \left[ 1 + \tau_n G \frac{\tau_n \cdot S}{(n_0 + \tau_n \cdot G)(L_n + \tau_n \cdot S)} \right]. \quad (7)$$

在弱激发情况下,与式(1)推导的情况类似<sup>[6]</sup>,我们可得近似式

$$V_n \approx \frac{D_n \tau_n^2 G}{\mu_n} \frac{S}{(n_0 + \tau_n \cdot G)(L_n + \tau_n \cdot S)}, \quad (8)$$

式(8)与式(1)明显不同.由式(8)可见,样品表面复合速率  $S$  越大,光伏信号就越大.这与前面所讨论的丹倍效应的结果式(1)是不一样的.我们所得的实验结果则与此一致,说明我们所讨论的机制是合理的.图 4 是在加直流偏置激光条件下 4 种样品的光伏谱,样品 LS1(切割片)表面质量最差,其光伏信号最强,随着样

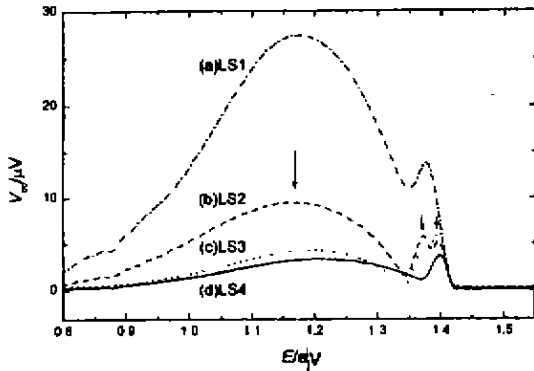


图4 室温下加激光偏置时4种不同表面质量的SI-GaAs样品LS1~LS4在带边附近和带边以下能量范围内的光伏谱。偏置激光能量为1.524eV,功率约为1mW

Fig. 1 The PV spectra of SI-GaAs samples LS1~LS4 at room temperature in the energy region near and below the band edge. The sample surface is illuminated by a laser beam of  $\sim 1\text{mW}$  at  $h\nu = 1.53\text{eV}$ , which is used as a dc optical bias.

品表面质量的提高,光伏信号也越来越小,样品LS4(细抛片)表面质量最好,光伏信号也最小。必须说明的是,在上面的讨论中,我们对粗糙表面的表面复合速率的分析是一个简化的模型,如果要作定量的分析,还需要对模型作更进一步的完善,但我们的模型已能较好地说明实验结果。

图4光伏谱中能量为1.398eV处的峰在4种样品中都存在,此峰比GaAs的带隙(在室温下为1.424eV)低26meV,它可能来自GaAs中C杂质形成的浅受主( $C_A$ )能级<sup>[1]</sup>,C杂质是不掺杂SI-GaAs中常见一种残留杂质,图中能量为1.370eV的峰则随着样品表面质量的提高及1.398eV峰的相对强度逐渐减小,直至消失,我们认为这个峰可能与表面损伤导致的点缺陷有关,样品LS1(切割片)中此峰和1.398eV处的峰已融合在一起,表现出位于1.380eV处较宽的大包络峰,可能是因为表面损伤严重,此峰展宽,因而和1.398eV处的峰融为一体。

图4中能量为0.7~1.36eV之间有一个大的展宽的包络峰,其峰值位置大约在1.20eV左右,且同样随样品表面质量的提高而减弱,我们认为可能此宽峰和样品处理过程因表面加工引起的As空位有关,Z. Q. Fang等人曾报道了非掺杂的SI-GaAs中两种与As空位有关的热激发电流陷阱T5和T6\*,这两个陷

阱分别位于GaAs带边下0.35eV和0.15eV处<sup>[12]</sup>,与我们观测到的缺陷峰可能有密切联系。

### 3 结论

我们通过加直流光偏置的光伏测量方法对不同表面的SI-GaAs样品进行测量,清楚地探测到了SI-GaAs中的杂质缺陷的光伏响应,并对其行为进行了简单解释,可以看到,光伏作为一种检测手段,对样品的表面很敏感,因而利用非破坏性的光伏方法对SI-GaAs圆片进行质量无损检测是非常有效的一种实验方法。

### REFERENCES

- [1] Stolte C A (Chp. 2). Ion Implantation and Materials for GaAs Integrated Circuits, Kirkpatrick C. G. Chen R. T. Holmes D. E. *et al.* (Chp. 3) LEC GaAs for Integrated Circuit Applications, *Semiconductors and Semimetals*, ed. by R K Willardson, A C Beer, New York: Academic, 1984, Vol. 20
- [2] Rehn V, Kyser D S. Transverse electroreflectance, *Phys. Rev. Lett.* 1967, **18**(20):848-852
- [3] Khachatryan K, Weber E R, Horigan J. Electrical spectroscopy of GaAs with intrinsic illumination, *Phys. Rev. B.* 1992, **46**(3):1365-1371
- [4] Wang Ruozhen, Jiang Desheng. Photoreflectance spectroscopy of semi-insulating GaAs, *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(8):3826-3828
- [5] Adams J C, Cappa C D, Falk R A, *et al.* Below band-gap electroabsorption in bulk semi-insulating GaAs, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(5):633
- [6] Liu Qiang, Chen Chao, Ruda Harry. Surface photovoltage in undoped semi-insulating GaAs, *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(12):7492-7496
- [7] Liu Qiang, E Ruda Harry. Role of deep-level trapping on the surface photovoltage of semi-insulating GaAs, *Phys. Rev. B.*, 1996, **55**(16):10541-10548
- [8] Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition. New York: Wiley, 1981
- [9] Luo C P, Jiang D S, Zhuang W H, *et al.*, Photovoltaic effect and its polarity in Si doping superlattices, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(13):1777-1779
- [10] Ashen D J, Dean P J, Hurle D T J, *et al.* The incorporation and characterisation of acceptores in epitaxial GaAs, *J. Phys. Chem Solids*, 1975, **36**(10):1041-1053
- [11] Fang Z Q, Look D C, Jones R L. Identification of Cu-related thermally stimulated current trap in undoped semi-insulating GaAs, *Journal of Electronic Materials*, 1997, **26**(12):L29-L31